

# 锦屏二级水电站7#机组发电机定子绕组一点接地故障分析及处理

孙彬, 邱小耕, 李佳佳

(四川二滩国际工程咨询有限责任公司, 四川 成都 611130)

**摘要:**锦屏二级水电站7#机组在正常运行过程中发生了定子绕组一点接地故障,随即定子接地保护动作停机。从各个角度出发,对此次事件发生的原因进行了详细分析并提出了处理措施。

**关键词:**定子;绕组;一点接地;锦屏二级水电站;故障;分析及处理

中图分类号:TV7;TV734;TV738

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2015)增2-0069-02

## 1 概述

锦屏二级水电站发电机由天津阿尔斯通公司设计与制造,发电机定子绕组由单匝线棒组成,6支路并联,“Y”形连接,主引出线从-Y轴方向引出。中性点引出线从第二象限引出,与+Y轴成50°角。中性点引出线分为2组中性点,一组为U、V、W相的1、2、3支路,另一组为U、V、W相的4、5、6支路,2组中性点引出线联接在一起并采用电力电缆引出至接地变压器接地。发电机注入式定子接地保护可单独实现发电机100%定子接地保护,与基波零序电压、三次谐波电压定子接地保护一样,为RCS-985发电机全套保护中的一个组成部分。

## 2 定子一点接地故障位置分析

电厂运行人员在2015年3月20日14时50分巡视7#机组时闻到刺激性绝缘异味,随即发现7#机组下齿压板温度高达71.5℃,平均温度为31.2℃,最终于2015年3月20日15时2分故障停机。事故发生后,首先对现场7#机组故障录波装置的故障波形数据进行分析,U20(20 Hz零序电压)和I20(20 Hz零序电流)波形发生异常,U20一个周波内有效值达到1.182 V(二次侧),I20一个周波内有效值瞬时达到0.01 mA(二次侧),故障发生前的其他相关数据见表1。通过对点故障录波数据进行初步分析得知:A、B两相电压升高,C相电压降低,属典型非直接接地系统单相接地故障特征,发电机C相发生了单相接地故障。

表1 故障发生前相关检测数据表

序号	名称	数值	单位
1	A相电压	63.45	V
2	B相电压	64.3	V
3	C相电压	48.01	V
4	发电机机端零序电压	18.02	V
5	发电机中性点零序电压	14.45	V

由表1可以看出:C相电压已经严重不平衡,机端零序电压大于中性点零序电压。由于锦屏二级水电站发电机中性点是经接地变方式接地的,发电机正常运行时的机端三次谐波电压 $U_{S3}$ 与中性点三次谐波电压 $U_{N3}$ 的比值为:

$$\frac{|U_{S3}|}{|U_{N3}|} = \frac{b_n}{b_s} \cdot bn = \frac{9}{2} \omega C_g - \frac{1}{3\omega L} (\text{机端总电纳})$$

(其中  $b_s = 9\omega(\frac{1}{2}C_g + C_t)$  (中性点总电纳)。式中  $C_g$  为发电机每相对地电容; $C_t$  为机端每相外部对地电容; $L$  为中性点接地变电抗)。只有当发电机未并列运行且中性点不接地变时,恒有  $\frac{|U_{S3}|}{|U_{N3}|} \leq 1$ 。因此,中性点的

三次谐波电压总是大于机端三次谐波电压的。故障发生前的相关检测数据见表1,发电机机端零序电压 $U_0$ 与发电机中性点零序电压 $U_N$ 的比值为1.247。结合故障发生前C相电压异常可以判断发电机C相绕组靠近中性点,可能存在接地故障(图1)。通过相关计算,首先判断接地故障类别:

### (1) 接地类别判断。

假设C相发生金属性接地: $\alpha$ 为故障点到中性点的距离百分比, $\alpha = \frac{18.02 \text{ V}}{100 \text{ V}} \times 100\% = 18.02\%$ 。

式中 100 V 为发电机出口 PT 开口三角形电压,故可确定故障点应位于距中性点 18% 附近的位置。

(2) 接地过渡电阻  $R_f$  及接地部位的计算。

根据图 1 可以推算出接地过渡电阻  $R_f = \sqrt{3}/$

$$\left[ \frac{2}{k} - 1 \right] / X_C - (\sqrt{3}/R_N), R_f \approx 27 \Omega.$$

①当  $R_f = \infty$  时,发电机未发生故障,机组中性点零序电压很小,接近于 0,  $\alpha$  接近于 0。

②当  $R_f = 0$ , 机组发生金属性接地故障, 机组中性点零序电压值很高,  $\alpha$  接近于 100%。

③当  $0 < R_f < \infty$  时,发电机发生非金属性接地。

$\alpha = \frac{|U_{N0}|^2}{|E_A|^2} \sqrt{\left(1 + \frac{r_f}{R_N}\right)^2 + \left(\frac{r_f}{X_C}\right)^2} = 0.26$ , 故障部位距离中性点距离百分比为 26% (其中  $U_{N0}$  为中性点零序电压,  $R_N$  为中性点接地变一次侧电阻)。

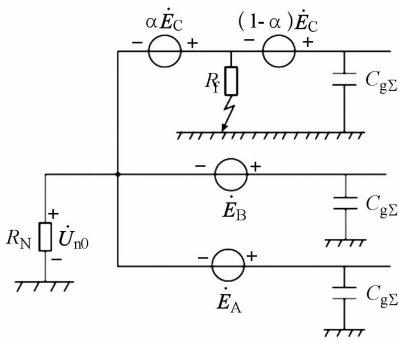


图 1 发电机 C 相接地故障示意图

由于锦屏二级水电站发电机定子 100% 接地采用 RCS - 985U 低频注入电源和 RCS - 985 保护装置两部分共同实现,而 RCS - 985U 为低频 20 Hz 注入电源。当发电机定子绕组的对地绝缘正常时,注入到定子绕组的低频电流主要是流过定子绕组的对地电容电流;当对地绝缘受到破坏、出现接地故障时,注入的电流将流过接地故障点而出现一部分电阻性电流。当保护装置检测到注入的低频电压、电流时,通过导纳法可以准确计算出接地故障的过渡电阻值。所计算的电阻值与定子绕组的接地故障位置无关,但其可以反映发电机 100% 的定子绕组单相接地的。通过对现场实际绕组进行检查得知,故障发生部位在 180 槽下侧上层线棒靠近齿压板区域。从绕组击穿部位看,此次接地故障应为非金属接地故障,是因电弧发生接地故障。现场对绕组三相绝缘电阻进行检测

得知,A、B 相正常,C 相无法加电压且阻值小于 10 kΩ。

经现场检查发现 7#机组发电机绕组 C 相第 180 槽上层定子线棒绝缘被击穿,发生接地故障。发电机定子槽数为 432 槽,每相由 6 个分支绕组并联,每个分支绕组包含 24 匝线圈,经核对发电机定子绕组图,第 180 槽的上层线棒处于 C 相第 2 分支的第 5.5 匝位置(以发电机中性点为起点),因此,故障点  $\alpha = \frac{5.5}{24} \times 100\% \approx 22.9\%$ ,与理论计算值基本吻合。

### 3 故障产生原因分析

通过对现场实际发生故障部位进行观察,发现该故障部位处于定子直线段下侧靠近齿压板部位。值得注意的是:该线棒下端绝缘盒灌注胶表面有开裂的痕迹,应是线棒内部聚集高温,然后在线棒绝缘最薄弱区域向外击穿,进而导致对齿压板放电,发生定子一点接地故障。通过对定子绕组损坏线棒外观情况、解剖后变形情况进行详细检查、分析,我们得出了以下结论:

(1) 大型发电机定子线棒在绝缘层或绝缘层与股线之间可能存在气隙或杂质。运行过程中,在电、热和机械力的联合作用下也会直接或间接地导致绝缘劣化,使得绝缘层间等产生新的气隙。由于气隙和固体绝缘的介电系数不同,这种由气隙(杂质)和绝缘组成夹层介质的电场分布是不均匀的,在电场作用下,当工作电压达到气隙起始放电电压时便会产生局部放电。局部放电起始电压与绝缘材料介电常数和气隙的厚度密切相关。

(2) 由于厂家现场工艺要求需对线棒直线段填充半导体硅胶低阻带,以保证低阻带和线棒本身的防晕层良好接触,待半导体硅胶固化后,确保线棒与铁芯等电位,防止电晕的产生。值得注意的是:低阻带在上、下铁芯端部截止部位的位置高出铁芯两端各 15 mm,此部分由于未受到铁芯的挤压,固化后仍可能存在间隙并在失去电接触后而产生容性放电,从而导致线棒表面的腐蚀和损伤;另外,发电机下导、推力轴承油槽会有汽化的透平油雾存在,在夹杂自冷却气流带动的杂质、灰尘的情况下,受污染的油雾被粘在线棒绝缘层表面液化,对绕组表层绝缘造成缓慢破坏。

(下转第 90 页)

架空强透水带的渗水通道,然后再采用高喷灌浆的措施进行全孔封闭处理。

### 3.2 堵漏方案的实施

#### 3.2.1 深层回填堵漏使用的机械设备

(1) 钻孔:采用 XYZ-70 潜孔钻。

(2) 制浆站设置一台 ZL400L 高速制浆机,拌制 0.6:1 的纯水泥浆, JJS-2 搅拌机配浆, SGB-10 灌浆泵输浆灌注。

#### 3.2.2 注浆

分别在 12.5 m、25 m 两处强透水带下管注浆,先采用静压注浆的方式进行灌注,以防止浆液扩散太远,初期在浆液中添加水玻璃(3% 水泥用量),最后采用低压(0.2 MPa)、浓浆对透水通道进行注浆。

#### 3.2.3 注浆控制过程

灌浆管预埋——注浆——屏浆。灌浆过程中根据围堰内侧渗水量确定灌浆结束时间。由于 1#~3# 孔渗水量较大,先在孔口注入掺量为 3% 水玻璃的浓浆,静压灌浆 3 h,然后以 0.05~0.1 MPa 灌浆压力逐级加压,每级持续 30 min,当压力增至 0.5 MPa、吸浆率为 5 L/min 时,渗水点已基本不再渗水,持续 30 min 后结束灌浆;4# 孔在灌浆压力增至 0.1 MPa 时吸浆率为 5 L/min,渗水点已基本不再渗水,持续 30 min 后结束灌浆。

(上接第 70 页)

(3) 线棒在下线过程中可能由于人为因素对该根线棒造成外绝缘损伤,以及机组运行过程中定子绕组温度的影响,最终造成绝缘层无法承受正常运行电压而导致由内向外的绝缘层被击穿。

### 4 现场采取的处理措施

拆除磁极;用棉布对 177~183 号线棒区域上下层之间的间隙进行防护,防止尘渣遗留在下层线棒表面;拆除上下端绝缘盒并剔除绝缘盒灌注材料;剔除槽楔,去掉波纹板、保护垫条、滑动垫条和层间垫条;拆掉线棒端部的绑扎带,取出该线棒左右两边的端部斜边垫块和聚酯毡,拔出线棒;打磨 181 号线棒下端部 R 部位的发黑部分;对新线棒进行绝缘电阻和耐压试验,然后采用与安装时相同的工艺进行定子绕组安装,涂刷 DK222(面漆)并干燥。重新进行定子绕组预防性直流耐压 50 kV 试验、交流耐压 30 kV 试验,试验合格后可

### 3.2.4 高喷封闭

对于堵漏后存在的细小渗水通道采用高喷封闭,控制标准同之前的高喷灌浆。

## 4 效果验证

通过对砂卵石(含漂块石)且有架空强透水路等复杂地层采用合理的高喷施工参数和深层堵漏措施,整个围堰达到了理想的防渗效果,基坑开挖揭示未发现较大渗水,进而为主体工程的施工创造了有利的条件。

## 5 结语

高压喷射灌浆用于水电站围堰基坑开挖防渗,关键在于施工设备、施工参数的选择及过程质量控制。针对不同的地质情况,科学地选用与之适应的高喷施工控制参数,将取得良好的防渗效果,对后续基坑开挖和主体工程施工干地作业提供有力的保障。

### 参考文献:

- [1] 水电水利工程高压喷射灌浆技术规范, DL/T 5200-2004 [S].
- [2] 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范, DL/T 5148-2012 [S].

### 作者简介:

冯立恒(1981-),男,河北邢台人,工程师,学士,从事水利水电工程建设技术与管理工作。(责任编辑:李燕辉)

具备开机并网条件。

## 5 结语

发电机定子一点接地是水电站机组比较常见的故障之一。定子下线过程中,一个小的失误都可能导致类似故障的发生。现场监理人员在机组安装过程中,通过深刻理解制造厂提出的技术要求、设备性能,同时对工艺执行过程进行严格管控和把关,将现场施工阶段可能导致类似故障发生的各种因素彻底消除,就能够为机组长期安全稳定运行奠定良好的基础。

### 作者简介:

孙彬(1989-),男,四川成都人,助理工程师,从事机电安装监理工作;  
邱小耕(1990-),男,重庆垫江人,助理工程师,学士,从事水利水电工程机电安装监理工作;  
李佳佳(1987-),男,贵州遵义人,助理工程师,从事水利水电工程机电安装监理工作。

(责任编辑:李燕辉)